快速射电暴的数据统计

余秋雨[1]，王培[2]，刘志杰[1]，

（1.贵州师范大学 贵州省信息与计算科学重点实验室，贵阳 550018；2.中国科学院 国家天文台，北京 100012）

摘要：快速射电爆（Fast Radio Burst 简称 FRB）于 2007 年首次在脉冲星搜索数据中被发现，是一种在射电波段强烈爆发的天体物理现象，其特征为持续时间一般仅为若干毫秒，峰值流量密度可达到央斯基量级。类似于射电脉冲星的单个脉冲但具有超过同一视线方向上整个银河系星际介质的预期总色散量，可作为研究离子化星系间介质和自由电子空间分布的宇宙学尺度探针。对截止 2018 年 6 月 Parkes 望远镜、GBT 望远镜、Arecibo 电望远镜、UTMOST 望远镜和 ASKAP 望远镜已探测到的 52 例 FRB 事件进行了观测量统计分析。排除来自银河系星际介质贡献的色散量后，FRB 平均色散量约为 584.521pccm^{-3}，这暗示 FRB 来自河外。通过最佳拟合估算红移幂律分布谱 dN/dFobs=4.14±1.30×$F_{obs}^{-1.12055}$sky^{-1} day^{-1}。FAST 望远镜使用 19 波束接收机探测灵敏度后，FAST 多科学目标同时扫描巡天（CRAFTS）中估计经过一年时间的科学运行，FAST 能发现大约 10 个 FRB，将有效的扩大样本，为 FRB 研究提供重要信息。

关键字：快速射电爆；强度分布；FAST

中图分类号：**P162** 文献标识码：**A**

Fast Radio Bursts Statistics

Abstract:Fast Radio Burst was first discovered in pulsar search data in 2007, it is intense radio flashes, can be a powerful probe for studying the ionized intergalactic medium and the spatial distribution of free electrons.After subtracting the contribution from the interstellar medium of our Galaxy, Their mean dispersion measure is found to be ~584.521pc cm^{-3}, supporting their being from cosmological origin. The law-distribution can be described asdN/dFobs=4.14 ± 1.30×Fobs$^{-1.12055}$sky^{-1} day^{-1}.Based on this intensity distribution function, CRAFTS will be able to detect about 10 FRBs for every a year of observation time.

Key words:Fast Radio Burst,intensitydistributionfunction,FAST

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）

收稿日期: 2018 - 11 - 21;

作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

1、引言

2007 年，一类新的射电暴首次在脉冲星搜索数据中被发现[1]。这类射电暴类似于射电脉冲星的单个脉冲具有超过同一视线方向上整个银河系星际介质的预期总色散（Lorimer et al. 2007)。因只有一个事例，当时并没有引起太多的重视。直到 2013 年多个类似的爆发信号被探测到（Thornton et al. 2013)，这类爆发被命名为快速射电爆（Fast Radio Burst, FRB），Thornton 等人（2013）首次在《science》上确认一个快速射电暴位置、宿主星系以及红移的研究结果[2]。该快速射电暴精确位置和宿主星系的确定，是继 2016 年初 LIGO 引力波探测之后天文和物理界最重要的发现，重要性在于确认了射电观测现象和宇宙学尺度天体物理起源的直接连接。主流学界认为其来自于宇宙学距离[3]，相关研究成为射电天文领域的热点。提出的模型包括伽马暴、黑洞并合、巨脉冲以及地球范围内的电磁效应等[4]。

到目前为共发表了约 52 个 FRB 的观测数据(FRBCAT, Petroff et al. 2018)。其中 22 个是 Parkes 望远镜在 1400MHz 波段发现的，2 个是 Arecibo 望远镜在 1400 MHz 发现的，1 是 GBT 望远镜在 800 MHz 发现的，4 个是 UTMOST 望远镜在 843MHz 发现的，其余是 ASKAP 望远镜在 1300MHz 发现的。扣除银河系星际介质的贡献后，这 52 个 FRB 平均的色散量为 584.521pc cm^{-3}，这暗示 FRB 来自河外。这些 FRB 的能量输出跨越了三个量级，平均值约为 10^{38}ergs，而 FRB 的持续时间通常为毫秒量级，通常观测时间持续在 1-10ms[4]（Katz et al. 2016)。由于 FRB 输出能量高，持续时间短，所以光度巨大。另一方面持续时间短也说明这些源非常致密。除此之外，我们获得的 FRB 的信息有限，进一步的观测限制[5]是这一领域的突破方向(Emily Petroffet al 2017)。

快速射电暴信号的色散延迟超过在视线方向上银河系的色散量总和。其宇宙学尺度的河外起源和高射电流量密度的观测特征，使快速射电暴的到达时间(TOA)可成为基本物理量精密测量的灵敏探针。比如[6,7]（Wei et al. 2015 PRL, 115, 261101; Keane et al. 2016 Nature, 530, 453)：测定宇宙距离、测量宇宙中的电子密度、大尺度宇宙学的精确测量对暗物质证据、FRB 对光子静质量、FRB 源属性、脉冲星单脉冲对脉冲星辐射机制、星际闪烁效应、重子起源和标准模型等，甚至检验爱因斯坦等效原理乃至量子引力理论的强有力工具[8-10]。随着观测积累的快速射电暴样本数目增加，甚至可通过样本色散延迟空间的多极矩来分析宇宙物质分布的成团性质，测量宇宙大尺度结构。

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

本文：将在第 2 节介绍 FRB 的搜寻过程，综述干扰消除、消色散和特征信号搜索等步骤。第 3 节对 FRB 样本进行了数据统计分析和观测量数据统计分析研究 FRB 特性，估算 FRB 的强度分布函数。第 4 节讨论 FAST 对 FRB 的观测前景。第 5 节进行总结和展望。

2、FRB 搜寻的数据处理

搜寻核心思想是：在有干扰信号的脉冲星巡天或 FRB 巡天数据中，寻找具有色散效应的短时标、强脉冲性信号。

FRB 信号数据量大,内存大和计算速度快的 cpu 或 gpu 保证 FRB 数据正确的导入。FRB 数据记录的辐射流量密度 F，是关于时间 t、频率 f 和偏振 p 的多元函数：

$$F=F(t,f,p) \qquad (1)$$

FRB 信号射频干扰消除处理是后期搜寻处理必备前提。根据 FAST 的 19 波束设备馈源参数设置，波束间互相会有少量交叉重叠区域。因而，望远镜不同波束会顺次经过同一射电源，但对同一源的观测存在时间差。为此，可利用多波束间数据和应用数据库技术开展交叉检验，识别射电源并改善源定位精度，准确提取 RFI 信息。具体算法采用多波束交叉相关和梯度下降检测技术结合算法：多波束交叉相关算法对两个同一观测时间点的不同波束进行时间位移的互相关，得出两个矩阵在时间差上的互相关系数，并进行波束间遍历和标准化。每个波束接收的辐射功率谱可由源与波束距离加权平均计算，再使用梯度下降最优化算法搜索源的可能发生位置，最后通过反卷积波束形状解构出多波束覆盖天区的源强度分布或侦测获取 RFI 所处频段分布信息。

对任一路偏振，巡天数据以一个二维数组的形式存放于 psrfits 或者 fits(The Flexible Image Transport System (FITS)文件中。在基本的搜寻过程中，所需完成的工作就是在 T(时间)-DM(色散量)组成的两维空间中搜索单脉冲强流量信号。当脉冲星信号传播过程中，会受到等离子体中的自由电子相互作用导致群速度由不同频率决定到达早晚，低频信号出现延迟，而高频信号的脉冲辐射较早抵达。故其信号的到达时间延迟和频率之间成平方反比关系。

$$\Delta t \propto v^{-2} \qquad (2)$$

不同频率的电磁波在介质中的传播速度不同，对于不同频率 f，信号到达延迟时间 t 为

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

$$t = D \times \frac{DM}{f^2} \quad (3)$$

其中，D 为色散常数：$D = \frac{e^2}{2\pi c m_e} = 4.148808 \times 10^3 MHz^2 pc^{-1} cm^3 s$, 色散量 DM=$\int_0^d n_e dl$表示快速射电暴的距离，从（4）式，DM 值的合理取值为

$$\delta\ DM = 1.205 \times 10^{-7} cm^{-3} pc.t_{samp} f^3/\Delta f \quad (4)$$

消色散完成后得到相应的数据，接着针对每 1 个 DM 值产生的数据进行判别。在检测器中，预先排除已知的脉冲星干扰并设置合理的信噪比和时间阈值参数，可以得到疑似的候选值，再对候选体筛选找到 FRB。

3、样本和统计分析

综合当前澳大利亚的帕克斯（Parkes）望远镜、美国的绿岸（GBT）望远镜、美国的阿雷西博电（arecibo）望远镜、UTMOST 望远镜(M. Caleet al 2016)和 ASKAP 望远镜共有 52 个快速射电暴。其中有一个是重复的快速射电暴 FRB121102，这个快速射电暴在 2012 年被美国阿雷西博射电望远镜第一次探测到，接着在 2015 年和 2016 年再次被 GBT 和美国的甚大天线阵总计 25 次探测到爆发，Tendulkar et al[12]第一次精确地测出该快速射电暴的红移和宿主星系，确认了快速射电暴的宇宙学起源。其余都是非重复的快射射电暴，52 个快速射电暴参数如表 1 所示。52 个 FRB 最小 DM 值为 114.1，最大的高达 2596.1；其中 Fobs=Speak×W，DMExcess=DM-DMGalaxy：

Table 1.1.截止到 2018 年 6 月已观测到的 52 个快速射电暴样木

FRB	telescope	l (degree)	b	DM (pc·cm^3)	DMGalaxy (pc·cm^3)	DMExcess (pc·cm^3)	SNR	Wobs (ms)	Speak (Jy)	Fobs (Jy·ms)	z1	z2	z3
FRB010125	parkes	356.641	-20.0206	790±3	110	680±3	17	9.4	0.3	2.82	1.001	0.931	0.861
FRB010621	parkes	25.434	-4.00381	745±10	523	222±10	16.3	7	0.41	2.87	0.594	0.524	0.454
FRB010724	parkes	300.653	-41.8051	375	44.58	330.42	23	5	30	150	0.394	0.324	0.254
FRB090625	parkes	226.444	-60.0303	899.55±0.01	31.69	867.86±0.01	30	1.92	1.14	2.1888	1.226	1.155	1.085
FRB110214	parkes	290.7	-66.6	168.9±0.5	31.1	137.8±0.5	13	1.9	27	51.3	0.207	0.137	0.067
FRB110220	parkes	50.829	-54.7663	944.38±0.05	34.77	909.61±0.05	49	5.6	1.3	7.28	1.29	1.22	1.15
FRB110523	GBT	56.12	-37.82	623.3±0.06	43.52	579.78±0.06	42	1.73	0.6	1.038	0.828	0.758	0.687
FRB110626	parkes	355.862	-41.7522	723±0.3	47.46	675.54±0.3	11	1.4	0.4	0.56	0.967	0.897	0.826
FRB110703	parkes	80.9978	-59.0191	1103.6±0.7	32.33	1071.27±0.7	16	4.3	0.5	2.15	1.515	1.445	1.375
FRB120127	parkes	49.2871	-66.2037	553.3±0.3	31.82	521.48±0.3	11	1.1	0.5	0.55	0.747	0.677	0.607
FRB121002	parkes	308.22	-26.2647	1629.18±0.02	74.27	1554.91±	16	5.44	0.43	2.3392	2.199	2.129	2.059

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

						0.02							
FRB121102	arecibo	174.95	-0.225138	557±2	188	369±2	14	3	0.4	1.2	0.32	0.32	0.32
FRB130626	parkes	7.45003	27.4203	952.4±0.1	66.87	885.53±0.1	21	1.98	0.74	1.4652	1.244	1.174	1.104
FRB130628	parkes	225.955	30.6556	469.88±0.01	52.58	417.3±0.01	29	0.64	1.91	1.2224	0.593	0.523	0.453
FRB130729	parkes	324.788	54.7446	861±2	31	830±2	14	15.61	0.22	3.4342	1.172	1.101	1.031
FRB131104	parkes	260.55	-21.9253	779±1	71.1	707.9±1	30	2.08	1.12	2.3296	0.783	0.713	0.643
FRB140514	parkes	50.8413	-54.612	562.7±0.6	34.9	527.8±0.6	16	2.8	0.471	1.3188	0.755	0.685	0.615
FRB141113	arecibo	191.9	0.36	400.3	188	212.3	8.4	2	0.039	0.078	0.145	0.075	0.005
FRB150215	parkes	24.6628	5.28092	1105.6±0.8	427.2	678.4±0.8	19	2.88	0.7	2.016	1.135	1.065	0.994
FRB150418	parkes	232.665	-3.2348	776.2±0.5	188.5	587.7±0.5	39	0.8	2.2	1.76	0.632	0.562	0.492
FRB150610	parkes	278	16.5	1593.9±0.6	122	1471.9±0.6	18	2	0.7	1.4	2.062	1.992	1.922
FRB150807	parkes	333.892	-53.5959	266.5±0.1	36.9	229.6±0.1	0	0.35	128	44.8	0.338	0.268	0.198
FRB151206	parkes	32.6	-8.5	1909.8±0.6	160	1749.8±0.6	10	3	0.3	0.9	2.452	2.382	2.311
FRB151230	parkes	239	34.8	960.4±0.5	38	922.4±0.5	17	4.4	0.42	1.848	1.294	1.223	1.153
FRB160102	parkes	18.9	-60.8	2596.1±0.3	13	2583.1±0.3	16	3.4	0.5	1.7	3.609	3.539	3.469
FRB160317	UTMOST	246.05	-0.99	1165±11	319.6	845.4±11	13	21	3	63	1.08	1.01	0.94
FRB160410	UTMOST	220.36	27.19	278±3	57.7	220.3±3	13	4	7	28	0.31	0.24	0.17
FRB160608	UTMOST	254.11	-9.54	682±7	238.3	443.7±7	12	9	4.3	38.7	0.521	0.451	0.381
FRB170107	ASKAP	266	54.1	609.5±0.5	35	574.5±0.5	16	2.4	24.1	57.84	0.819	0.749	0.679
FRB170416	ASKAP	337.6	-50	523.2±0.2	40	483.2±0.2	13	5	19.4	97	0.695	0.625	0.555
FRB170428	ASKAP	359.2	-49.9	991.7±0.9	40	951.7±0.9	10.5	4.4	7.7	33.88	1.352	1.282	1.212
FRB170707	ASKAP	269.1	-50.5	235.2±0.6	36	199.2±0.6	9.5	3.5	14.8	51.8	0.292	0.222	0.152
FRB170712	ASKAP	329.3	-51.6	312.79±0.07	38	274.79±0.07	12.7	1.4	37.8	52.92	0.401	0.331	0.261
FRB170827	UTMOST	303.2	-51.7	176.8±0.04	37	139.8±0.04	110	0.4	60	24	0.211	0.141	0.071
FRB170906	ASKAP	34.2	-49.5	390.3±0.4	39	351.3±0.4	17	2.5	29.6	74	0.51	0.44	0.37
FRB171003	ASKAP	283.4	46.3	463.2±1.2	40	423.2±1.2	13.8	2	40.5	81	0.6	0.53	0.46
FRB171004	ASKAP	282.2	48.9	304±0.3	38	266±0.3	10.9	2	22	44	0.38	0.31	0.24
FRB171019	ASKAP	52.5	-49.3	460.8±1.1	37	423.8±1.1	23.4	5.4	40.5	218.7	0.609	0.539	0.469
FRB171020	ASKAP	29.3	-51.3	114.1±0.2	38	76.1±0.2	19.5	3.2	117.6	376.32	0.124	0.054	0.01
FRB171116	ASKAP	205	-49.8	618.5±0.5	36	582.5±0.5	11.8	3.2	19.6	62.72	0.815	0.745	0.674
FRB171213	ASKAP	200.6	-48.3	158.6±0.2	36	122.6±0.2	25.1	1.5	88.6	132.9	0.167	0.097	0.027
FRB171216	ASKAP	273.9	-48.4	203.1±0.5	37	166.1±0.5	8	1.9	21	39.9	0.245	0.174	0.104
FRB180110	ASKAP	7.8	-51.9	715.7±0.2	38	677.7±0.2	35.6	3.2	128.1	409.92	0.967	0.897	0.827
FRB180119	ASKAP	199.5	-50.4	402.7±0.7	36	366.7±0.7	15.9	2.7	40.7	109.89	0.512	0.441	0.371
FRB180128.0	ASKAP	326.7	52.2	441.4±0.2	32	409.4±0.2	12.4	2.9	17.5	50.75	0.582	0.512	0.441
FRB180128.2	ASKAP	327.8	-48.6	495.9±0.7	40	455.9±0.7	9.6	2.3	28.7	66.01	0.656	0.586	0.515
FRB180130	ASKAP	5.9	-51.8	343.5±0.4	39	304.5±0.4	10.2	4.1	23.1	94.71	0.445	0.375	0.305
FRB180131	ASKAP	0.6	-50.7	657.7±0.5	40	617.7±0.5	13.8	4.5	22.2	99.9	0.884	0.814	0.744
FRB180212	ASKAP	338.3	50	167.5±0.5	33	134.5±0.5	18.3	1.81	53	95.93	0.196	0.126	0.056
FRB180315	ASKAP	13.2	-20.9	479±0.4	36	443±0.4	10.4	2.4	23.3	55.92	0.572	0.502	0.432
FRB180324	ASKAP	245.2	-20.5	431±0.4	70	361±0.4	9.8	4.3	16.5	70.95	0.504	0.434	0.364

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

FRB180525	ASKAP	349	50.7	388.1±0.3	31	357.1±0.3	27.4	3.8	78.9	299.82	0.506	0.436	0.365

表 1 截止 2018 年 3 月观测到的 52 个快速射电暴样本[1]第 1 列提供了 FRB 名称；第 2 列指明观测的所属望远镜。第 3 列和第 4 列分布给出各个快速射电暴的银经（l）和银纬（b）；第 5,6 和 7 列分别显示了观察到的快速射电暴的色散量（DM），来自银河系所贡献的色散量（DM_{Galaxy}）和对应的色散量（DM_{Excess}）；第 8 列是信噪比；第 9 列给出了观察到的观测脉冲宽度（W_{obs}）。第 10 列是 FRB 的峰值流量密度（S_{peak}）；第 11 栏以 Jyms 为单位列出观测流量（F_{obs}）；第 12,13 和 14 列是分别在 DM_{host} 为 0、50 和 100 时的红移值。注红移计算通过 YMW16 包含了一个星系间介质中自由电子密度的模型，FRB12110 不存在该假设，其红移已明确。

注：表格源自网站 astronomy.swin.edu.au/pulsar/frbcat

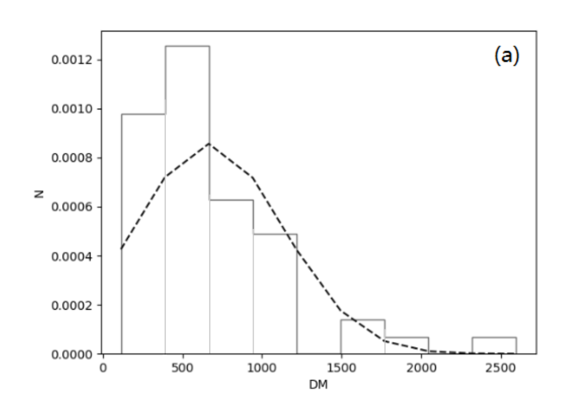
Table1 Column 1 shows the FRB names, Column 2 indicates the telescope,The longitude and latitude of each FRB are given in Column 3,4. Column 5,6,and 7 provide the observed DMs of FRBs, the DM contributions from the Galaxy and the DMExcess, respectively. SNR is presented in Column 8.Column 9 provides the observed width duration of the corresponding ratio pulse(Wobs).Column 10 is the observed peak flux density(Speak) of each FRB.Column 11 tabulates the observed fluences(Fobs).Column 5,6,and 7 provideredshift values at DMhost 0, 50, and 100, respectively.

Data from http://y.swin.edu.au/pulsar/frbcat/ (Petroff et al. 2018)。

大多数快速射电暴的银纬分布范围从 2.6063° 到 83.2938° ，FRBs 在各个天空的角度方向上分布机率相等，应该具有各向同性(Keith W. 2014)。其中，存在有 FRBs 空间分布位置十分接近如 FRB140514 和 FRB110220，两者之间位置仅相差 9 角分左右，两者 DM 相差 380pc cm^{-3}。对此 Piro&Burke-Spolo 认为其是同一个 FRB,起源于超新星遗迹中的中子星[13]，由于超新星喷流膨胀会导致天体源附近环境发生变化，导致色散量发生改变[14]。此外比较相同纬度 FRB 和脉冲星的色散量时发现FRB的色散量显著偏高,超出银河系所贡献的色散量的10—20倍，该情况被认为主要是星际介质中自由电子所导致。

3.1 数据分析

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com



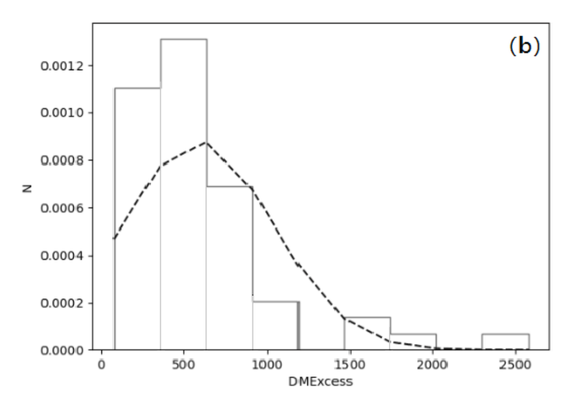


图 1DM 和 DMExcess 的统计直方图

Fig.1statistical histogram of DM and DMExcess

对 FRB 色散量进一步观察，DM 的函数峰值为 664.5246pccm^{-3}，而 DMExcess 峰值为 584.521pccm^{-3}。其中 DMExcess 占 DM 的 87.95%，支持了 FRB 是天文学起源。如图 1 里图 a 和图 b 所示的 DM 和 DMExcess 的直方图的拟合曲线呈瑞利分布，且属于σ为 1 的瑞利分布情况。根据瑞利公式

$$y=\begin{cases}\frac{x}{\sigma^2}e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} & ,x>0\\ 0 & ,\ x\le 0\end{cases} \quad (5)$$

推导出 DM 与 FRB 数量的关系，公式如下：

$$N=DMe^{-\frac{DM^2}{2}} \quad (6)$$

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

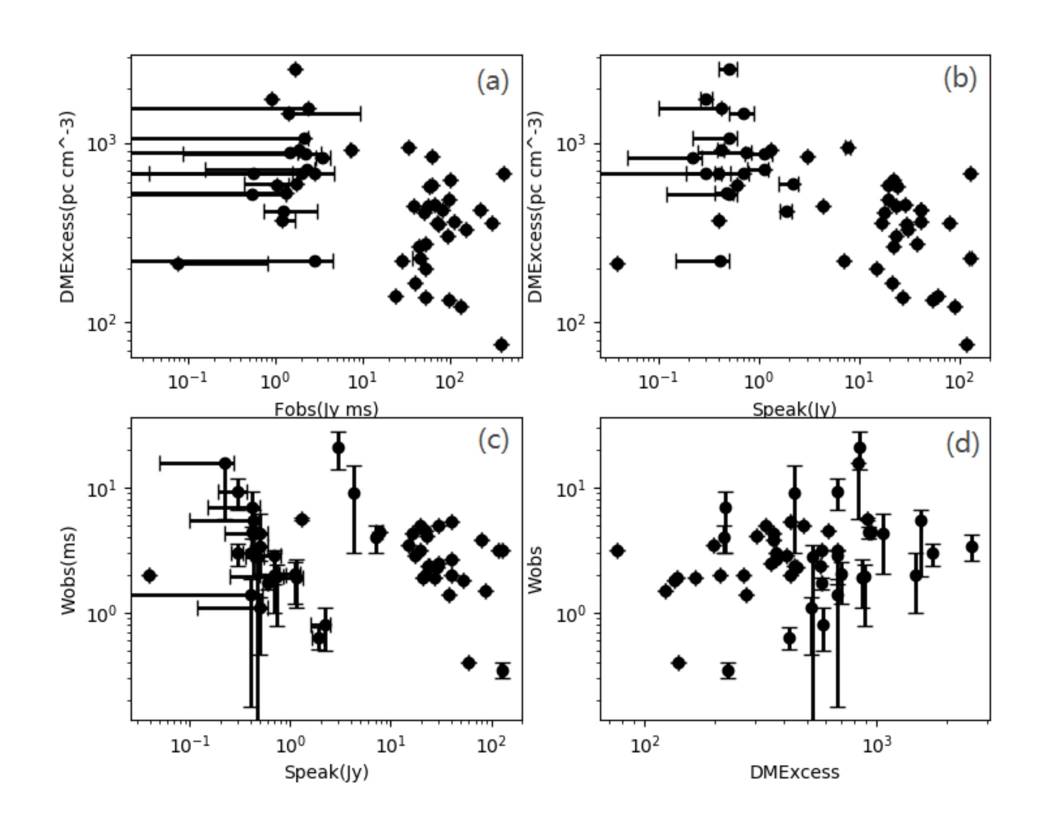


图 2 分别给出了观测流量密度、峰值流量密度与 DM_{Excess} 的相关性；峰值流量密度、对应色散量与脉冲宽度的相关性

Fig2The correlation between Fobs, Speak and DMExcess respectively. The correlation between Speak DMExcess and Wobs respectively

注：误差棒的取值源自文献[12]

图上（a）、（b）显示 Fobs 和 Speak 与 DM_{Excess} 没有任何明显的相关性，出乎理论上的结果，可能存在两方面原因：1.星系际（IGM）介质的电子密度分布不清，模型依赖严重，需要更多样本和多波段观测约束和提高 IGM 电子密度模型的真实性；2.FRB 能量输出跨越数个量级，不能完全体现 $1/r^2$ 的距离相关性也是正常的。根据图内容大致得到显示 Fobs 和 Speak 与 DM_{Excess} 呈现负相关关系。（c）说明部分较强的流量密度的快速射电暴具有较窄的脉冲宽度，这些符合脉冲星的巨型脉冲的相关性质，Geng&Huang 提出，小行星与中子星的碰撞接触面积小时，发生的碰撞更激烈，导致流量密度较大快速射电暴更亮，即碰撞接触面积大时，碰撞过程出现延长，造成流量密度较小快速射电暴更暗[15]，故快速射电暴可能起源于小行星与中子星碰撞。图（d）说明脉冲宽度和

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

DM_{Excess}具有正相关关系，脉冲宽度越大，DM_{Excess}越大。

图 3 图 a 观测流量密度与红移的相关性；图 b 对应色散量与红移相关性

Fig3 panels (a) correlation between Fobs and z. panels(b) correlation between DMExcess and z

采用了 YMW16 包含了一个星系间介质中自由电子密度的模型，计算 FRB 红移。无法确定 FRB 是否源于宿主星系，所以 DMhost 的不同取值作为红移的统计误差；选择的 IGM，目的是为避免脉冲星的 DMs 大于该方向的最大 YMW16 模型预测值(显然不正确)。图（a）明显看到红移和观测流量没有相关的关系，图（b）红移和 DM 成线性关系，随着 DM 的增大红移随着加大，通过红移和 DM 都可大致确定射电暴所在。此外，重复射电暴 FRB121102 的重复爆发被确定了天区明确宿主星系和红移最有可能的值是 0.32（Cordes,Lazio）[16,17]。研究学者关于该重复射电暴认为有可能的前身星物理模型有软伽马重复暴[18]、磁化中子星穿过小行星带[19]以及中子星-白矮星双星系统等[20]。

3.2 强度分布

曾统计 FRB 具有非泊松重复[21]，且现实爆发更加复杂，从观察推断出的事件率取决于观察策略（Liam Connor 2016）。当前数据采取幂律函数的统计分布情况，将一条斜率为幂指数的负数的直线，也就是幂律函数去是判定 FRBs 强度分布，助于今后发现更多的 FRB。采取 Tavanid[22]对伽马射电暴的峰值流量密度的累计

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

分布结果，因为在峰值流量密度较小的一段改分布明显的偏离欧几里得平坦空间的 $N\propto S_{peak}^{-3/2}$ 关系，然后改结论被伽马暴红移被精确测定后证实是正确，考虑对快速射电暴进行类似研究，此外 Bera et al[23]，Wang&Yu[24]，Lilongbiao[25]等等许多研究者将 Fobs 作为统计分析和宇宙学应用的选择。故将每天在特定的效应 Fobs 下出现的 FRB 的实际数密度去做幂律分布分析，公式如下

$$\frac{dN}{dF_{obs}}=AF_{obs}^{-a} \quad (7)$$

其中 A 是以事件 sky^{-1}天为单位的常系数和 a 是幂律指数。A 和 a 都需要通过观察来确定。

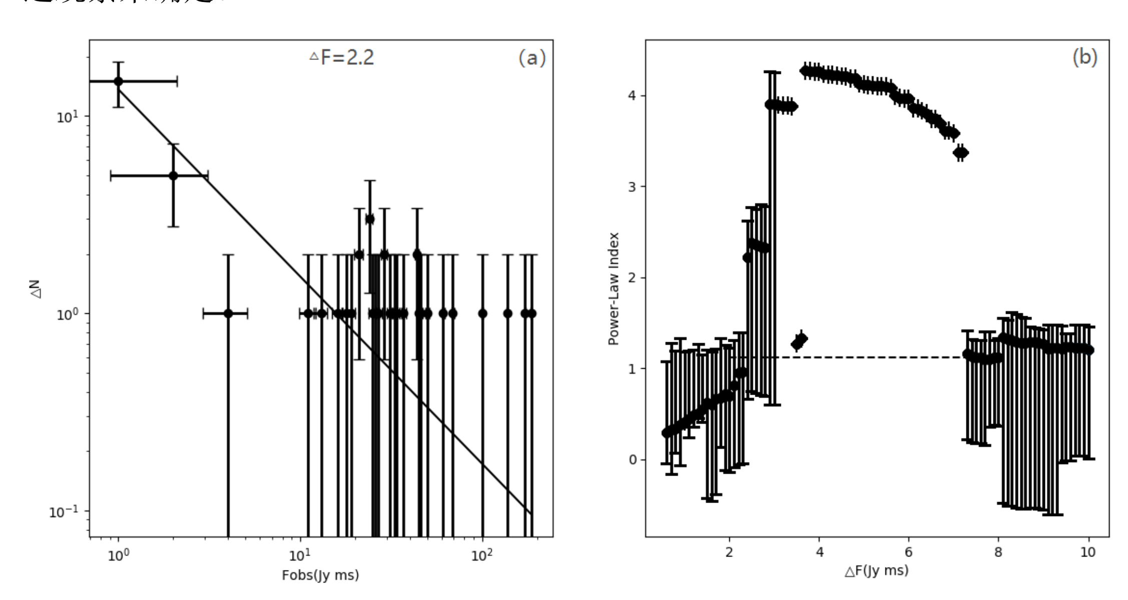


图 4（a）表示观测流量密度组距为 2.2 时的强度分布函数，X 轴的误差棒代表组距的大小，Y 轴表示每个区间对应的 FRB 数目，其误差棒为统计误差，即区间内样本数目的平方根值。(b)将 FRBs 按照不同的 Fobs 组距划分后拟合得到的幂律指数 a。

Fig4 panels(a) provides the intensity distribution function when ΔF=2.2,The error bar on the X-axis represents the size of the spacing, and the Y-axis represents the number of FRBS corresponding to each interval. The error bar is the statistical error, namely the square root value of the number of samples within the interval. (b) the power law exponent a obtained by fitting FRBs according to different Fobs group spacing partition.

因为当前 FRB 的总数量不足够多，所以组距的选择至关重要。将 52 个非重复快速射电暴的峰值流量密度宽度尝试各种不同值来研究其效果，因为 FRBs 的观测流量值范围跨度较大，所以当组距非常小（Δ Fobs≤2）时，分组的数目多，数据点过于分散，拟合时效果极差，不可用于分析强度分布函数；当组距过大（Δ Fobs≥8）时，分组误差较大，计算的结果没有意义；中间存在一段组距（3

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

≤Δ Fobs≤7.3）时，每个分组的数目跳动过大，拟合的线穿过的数据太少，幂律指数太大，将其作为异常值。Δ Fobs 在 2 到 3 以及 7.3 到 8 之间的范围内时，最适合用来计算幂律分布函数的参数。统计合适的组距里的斜率，采用斜率的平均值作为幂律指数 a，根据图 4 知 a 取 1.12055。

F_{Limit} (Jyms)	R（>F_{Limit}）($sky^{-1}day^{-1}$)	Reference	Derived coefficien ($10^3sky^{-1}day^{-1}$)
3.0	10^4	Thornton et al 2013	5.61±2.04
0.35	3.1×10^4	Spitler et al	7.88±6.92
2.0	$2.5\times10^{4、3}$	Keane et al 2015	1.17±0.51
1.8	1.2×10^4	Law et al 2015	5.37±2.47
4.0	4.4×103	Rane et al 2016	2.86±0.90
0.13-5.9	6.0×103	Champion et al 2013	1.94±1.27
0.03	3.3×10^4	Long-Biao Liet al 2016	4.14±1.30

表 2 文献中 FRBs 的 A 值

Table 2 A values of FRBs in literature

选择 FAST 设备来研究 FRB 的探测情况，采取 A=4.14±1.30×$10^3sky^{-1}day^{-1}$（Long-Biao Liet al 2016）。故 FRB 的强度分布函数为：

$$\frac{dN}{dFobs} = 4.14 \pm 1.30 \times 10^3 \times F_{obs}^{-1.12055} sky^{-1} day^{-1} \quad (8)$$

4、FAST 对 FRB 的观测前景

射天天文学的发展必备高灵敏度的大口径射电望远镜，目前在大型望远镜巡天设备有美国 305m 射电望远镜 Arecibo 、德国 Effelsberg100m 射电望远镜、澳大利亚 64m 射电望远镜 Parkes 和中国 500m 射电望远镜等，其中中国的 Fast 是建于贵州平塘的 500 米口径射电球面望远镜，利用天然的喀斯特洼坑作为台址，数千块可调节的单元构成 500 米球冠主动反射面，作为世界上最大、最灵敏的单口径射电望远镜,将在中性氢巡视、脉冲星搜索、国际 VLBI 网联测及地外生命搜寻等重要前沿领域取得突破[26]。FAST 天空覆盖的顶峰角度为 26.4°（Li di et

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

al 2018）,观测频率为 70 MHz ~3 GHz (未来可升级到 8GHz)，接收机波束数为 19 (未来焦平面阵列大于 100)，灵敏度(L 波段)为 18K Jy^{-1}，系统温度为 Tsys≈50K，天空覆盖范围为赤纬−14° 12′ ≤δ≤65° 48′ 。和 Arecib 望远镜相比，Fast 的原始灵敏度高 2.5 倍[27]，巡天速度高 10 倍，综合灵敏度高 10 倍，覆盖的天区是 2 到 3 倍。FAST 的接收器将覆盖低频（70 到 500MHz）和中频（0.5 到 3GHz）频段。Fast 有助于发现更多 FRB，对于更深一步的 FRB 研究也会大有帮助。在探测毫秒脉冲星、脉冲双星、双脉冲星和银河系外的脉冲星等方面更具优势。FAST 还具有发现脉冲星黑洞体系的科学潜力，这将有助于了解黑洞的精确信息。

FAST 的 19 波束的优势和特点，有助于开展多科学目标同时扫描巡天：脉冲星搜索、气体星系搜索、银河系中性氢成像、快速射电源的搜索。世界上其他射电望远镜，还没有这四大目标同时进行，是世界上没有前例的开创。构建出比较有效的扫描巡天模式，提供给全国天文学者，产生系统性的发现和重大突破。多科学目标同时扫描巡天测量 FRB 还具备实时触发机制，可将基带数据再 1 分钟内完成保存在环形缓冲区中。具有前所未有的快速、最小的系统控制复杂性和 RFI 降低保证获得最佳系统性能。

通过预期 FAST 的观测限定 FRB 的发生条件，给出 FRB 发生概率的估计。在不考虑台址射电环境干扰的理想条件下，根据 FRB 事件的全天爆发率，和 FAST 采用 19 波束接收机探测灵敏度、FAST 可见天区范围（~41000 平方度）和波束尺寸（19 波束覆盖~0.15 平方度），FAST 的灵敏度或流量密度下限可通过下式估算(zhang et al. 2015)[28]：

$$S_{limit} \sim (12\mu Jy)\left(\frac{0.77\times\frac{10^3 m^2}{k}}{\frac{A_e}{T_{sys}}}\right)\left(\frac{SNR}{3}\right)\left(\frac{1\,hour}{\Delta\tau}\right)^{1/2}\left(\frac{100\,MHz}{\Delta\nu}\right)^{1/2} \quad (9)$$

其中，T_{sys}是系统温度，△τ是积分时间，SNR 为信噪比，通常取 10 作为可靠的 FRB 检测(Champion et al. 2016)，△v是观测带宽，A_e是有效面积。由（Li et al. 2017）知，FAST 的观测流量限制为 $F_{limit}=S_{limit}\times\triangle\tau=0.03$Jy ms.

$$R = A\int_{Flimit}^{F_{max}} F_{obs}^{-a}\, dF_{obs} \quad (10)$$

其中，$Flimit$是射电望远镜的灵敏度，Fmax 是快速射电暴观测流量的上限。

$$R_{fast} \sim 3.578 \pm 1.30 \times 10^4 \times \frac{0.15\,deg^2}{41253\,deg^2}\, day^{-1} = 0.13\ \mathrm{day}^{-1} \quad (11)$$

根据上式，可计算出 FAST 在 1000 小时内可探测到约 6 个 FRB,，FAST 19 波束每日巡天 8 小时将采集到约 5TB 量级的数据。全年可工作 200 余天一年的

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）
收稿日期: 2018 - 11 - 21;
作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

观测时间可以探测到约个 10 FRB。

5、总结与展望

本文统计分析了 Parkes 望远镜、GBT 望远镜、Arecibo 电望远镜、UTMOST 望远镜和 ASKAP 望远镜探测到的截止 2018 年的 52 个 FRB 关键参数。FRB 空间分布呈现各向同性，DM 范围从 114.1 到 2596.1 pccm-3，峰值为 664.5246 pccm-3，而 DMExcess 峰值为 584.521 pccm-3。而占 DM 总量的约 87.95%。表明 Speak、Fobs 与 DMExcess 没有任何明显的相关性，存在有 DM 和红移呈现正比关系。

将观测流量作为 FRB 强度的因素之一，计算快速射电暴事件发生率，计算出幂律分布函数的指数 a 约为 1.12055，强度分布函数 dN/dFobs=$4.14 \pm 1.30 \times 10^3 \times F_{obs}^{-1.12055}$sky^{-1} day^{-1}。其中存在有几个因素误差。第 1，目前观察到的 FRB 总数仍然非常有限。它可能会导致测量的幂律指数有较大的波动。至少需要约 100FRB，才能提取有关 FRB 物理性质的结论性信息。第 2，FRB 不是理想的标准。第三，FRB 可能不是同质的光源，共移动密度或其亮度可能会在太空中演变。FRB 事件实际上可能实际上发生在天空中，但由于当前的技术限制，我们无法记录或找到它们，未来将需要更多新的 FRB 样品。

综上所诉，计算出的强度分布函数还只是一个中期阶段的结果。以后需要更多样本来更准确地确定幂律指数。FAST 望远镜具有大口径面积和多波束探测，对 FRB 的探测有很大帮助，有助于增加发现 FRB 样本。更重要的是，FAST 可以在很宽的频率范围内工作，并且可以为 FRB 提供详细的频谱信息，通过预期 FAST 的观测限定 FRB 的发生条件，给出 FRB 发生概率的估计，计算出 FAST 在 1000 小时内可探测到约 6 个 FRB，一年的工作时间内探测到 10 个 FRB,有望成为该领域的强大工具。

致谢

回首完成这篇论文的过程，我是极度幸运的，这篇论文集合实验室里刘老师和许余云师兄的指导、王培师兄的大力帮助、袁建平老师修改和远在美国读研的研究天体物理的王珅同学的指点。

作为一个对天体物理充满好奇的人，感谢王培师兄带我一步步的走进快速射电暴的领域，不仅给予我充分的相关文献，还在百忙之中帮助我修改论文，感谢您宝贵的时间和让人感动的细心修改和批注，看着被您改过一遍遍的红色批注虽然会气自己怎么又没写好，但是更感动的是您的认真修改和谆谆教导。此外，还帮我

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）

收稿日期: 2018 - 11 - 21;

作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

找到了袁老师和王同学一起来合力帮助。同时，也感谢天文研究与技术杂志的审稿老师，给了很多宝贵意见。最后感谢万永波同学在我编程过程的协助，遇到问题时和他交流沟通后，效率极大提高。感谢你们的帮助，我很幸运，我也要更努力更积极向上的去珍惜这份幸运。

参考文献

[1]Lorimer D R,BailesM,McLaughlin M A,et al. A Bright Milisecond Radio Burst of Extragalactic Origin,Science,2007,318:777

[2]ThorntonD,StappersB,BailesM,etal.A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distance.Science,2013,341:53-56

[3]KeithW.The Galactic Position Dependenceof FAST Radio Burstsand The Discoveryof FRB011025.2014.33

[4]Katz J I. Fast radio bursts——A brief review: Some questions, fewer answers.Modern Physics Letters A,2016,31:1630013

[5]Emily Petroff et al. VOEvent Standard for Fast Radio Bursts.2017. arXiv:1710.08155v1

[6]Wei J J,GaoH,Wu X F,et al. Testing Einstein's Equivalence Principle With Fast Radio Bursts.Physical Review Letters,2015,115(26):261101

[7]Keane E F,JohnstonS,BhandariS,etal.The host galaxy of a fast radio burst.Nature,2016,530:453-456

[8]M. Cale et al. Fast Radio Transient searches with UTMOST at 843 MHz.2016.122

[9]Liam Connor,Ue-Li Pen. FRB repetition and non-Poissonian statistics,2016,118

[10]Wei J J,GaoH,Wu X F,etal.Tesing Einstein's Equivalence Principle With Fast Radio Bursts.Physical Review Letters,2015,115(26):261101

[11]Liam Connor, Ue-Li Pen. FRB repetition and non-Poissonianstatistics,2016,118

[12]Tendulkar S P,Bassa C G,Cordes J M,etal.The Host Galaxy and Redshift of the Repeating Fast Radio Burst FRB 121102. The Astrophysical Journal Letter,2017,834:L7

[13]Piro A L and Burke-SpolaorS.What if the Fast Radio Bursts 110220 and 140514 Are from the Same Source? The Astrophysical Journal Letter,2017,841:L30

[14]Piro A L and Burke-SpolaorS.What if the Fast Radion Bursts 110220 and 140514 Are from the Same Source? The Astrophysical Journal Letter,2017,841:L30

[15]Geng J J and Huang Y F.Fast Radio Bursts:Collisions between Neutron Stars and Asteroids/Comets.The Astrophysical Journal,2015,809:24

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）

收稿日期: 2018 - 11 - 21;

作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com

[16]Cordes J M and Lazio T J W. NE2001.II. Using Ration Propagation Data to Construct a Model for the Galactic Distribution of Free Electrons.ArXiv Astrophysics e-prints,2003

[17]Cordes J M and Lazio T J W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations. ArXiv Astrophysics e-prints,2002

[18]Kulkarni S R,Ofek E O,Neill J D,etal.Giant Sparks at Cosmological Distances?The Astrophysical Journal,2014,797:70

[19]Dai Z G,Wang J S,Wu X F,etal.Repeating Fast Radio Bursts from Highly Magnetized Pulsars Traveling through Asteroid Belts.The Astrophysical Journal,2016,829:27

[20]Gu W M,Dong Y Z,LiuT,et al. A Neutron Star-White Dwarf Binary Model for Repeating Fast Radio Burst 121102.The Astrophysical Journal,2016,823:L28

[21]Liam Connor, Ue-Li Pen,NielsOppermann. FRB repetition and non-Poissonian statistics.arXiv:1601.04051v1

[22]TavaniM.Euclidean versus Non-Euclidean Gamma-Ray Bursts.The Astrophysical Journal Letter,1998,497:L21-L24

[23]BeraA,Bhattacharyya S, Bhaeadwaj S, et al. On modelling the Fast Radio Burst population and event rate predicitons. Mon. Not.R.Astron.Soc.,2016,457:2530-2539

[24]Wang F Y and Yu H.SGR-like behavior of the repeating FRB 121102.Journal of Cosmology and Astroparticle Physics,2017,3:023

[25]Long-Biao Li.Intensity Distribution Function and Statistical Properties of Fast Radio Bursts.RAA.2016.26

[26]南仁东,李会贤,FAST 的进展——科学、技术与设备,中国科学：物理学力学天文学，2014,44 10

[27]刘鹏，王培，李菂等，FAST 19 波束脉冲星漂移扫描巡天模拟，2018,5,36 2

[28] Li di et al FAST In Space.IEEE.2018. 1527-3342

基金项目：国家自然科学基金（U1631132）

收稿日期: 2018 - 11 - 21;

作者简介: 余秋雨，女，硕士． 研究方向: FAST 数据处理研究． Email: gznuyqy@163.com